



EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

Emili Õun

**MADALPINGEVÕRGU LIHTSUSTATUD DIGITAALNE
MUDEL ÕPPEVAHENDINA**
SIMPLIFIED DIGITAL MODEL OF LOW VOLTAGE NETWORK
AS LEARNING TOOL

Bakalaureusetöö

Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: professor Andres Annuk, *PhD*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Emili Õun		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Madalpingevõrgu lihtsustatud digitaalne mudel õppevahendina			
Lehekülgi: 40	Jooniseid: 14	Tabeleid: 5	Lisasid: 5
Osakond/õppetool: Energiakasutuse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika			
4.17 Energeetikaalased uuringud			
T140 Energeetika			
Juhendaja: professor Andres Annuk, <i>PhD</i>			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Eesti Maaülikool, 2021			
<p>Erinevad tehnoloogia alad on tänasel päeval kiiresti arenevad laialdase infotehnoloogia integratsiooni tõttu. Viimasest tingituna nõuab tehnikaalne tööturg aina enam oskusi projekteerimises, programmeerimises ning visualiseerimises. Kuna erinevaid programme on palju ning õpitava maht väga laialdane, on keeruline kaasata infotehnoloogilisi lahendusi õppeprotsessi. Energiakasutuses ning elektrienergeetikas on olulisel kohal elektrivõrgud ning vastaval tööturul nende projekteerimise ning modelleerimise oskus. Antud bakalaureusetöö eesmärk on uurida madalpingevõrgu elemente ning nendest moodustada õppemudel, mida saab kasutada elektriala õppeainetes õppevahendina kas programmi või loodud mudelit uurides.</p> <p>Madalpingevõrk koosneb nagu iga teine elektrivõrk kolmest peamisest elemendist: tootjad, ülekandeliinid ja –kaablid ning tarbijad. Mudeli koostamisel on oluline luua kõigepealt võrk elektriliinidest ja alajaama trafodest ning seejärel ühendada vastavalt soovitud tulemusele tootjad ja tarbijad. Simaris Design programm pakub lihtsustatud lahendust luua selline võrgumudel ning saada sellest väljundid, mille põhjal on võimalik teha analüüsi õppe eesmärgil või projekteerida võrk realses elus kasutatavaks lahenduseks.</p>			
Märksõnad: madalpingevõrk, Simaris Design, võrgumudel, õppemudel, lühisvoolud			



Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor’s Thesis	
Author: Emili Õun		Curriculum: Engineering	
Title: Simplified Digital Model of Low Voltage Network as Learning Tool			
Pages: 40	Figures: 14	Tables: 5	Appendixes: 5
Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17 Energetic Research T140 Energy Research Supervisor: professor Andres Annuk, <i>PhD</i> Place and date: Estonian University of Life Sciences, 2021			
<p>Today, various fields of technology are developing rapidly due to the extensive integration of information technology. Due to the latter, the technical labour market increasingly requires skills in design, programming and visualisation. As there are many different programs and the scope of the study is very wide, it is challenging to include IT solutions in the learning process in schools. Electrical networks and the ability to design and model them play an essential role in the labour market of electrical engineering and engineering in general. This bachelor's thesis aims to study the elements of a low-voltage network and create a study model from them, which can be used in electrical subjects as a study tool either by studying the program or the created model.</p> <p>Like any other electrical network, the low-voltage network consists of three main elements: producers, transmission lines and cables, and consumers. When creating the model, it is essential to develop a network of power lines and substation transformers and then connect producers and consumers according to the desired result. The Simaris Design program provides a simplified solution to create such a network model and obtain outputs from it, which can be used for analysis for learning purposes or to design a network for a real-life solution.</p>			
Keywords: low-voltage network, Simaris Design, network model, study model, short circuit currents			

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1. MADALPINGEVÕRGU ELEMENDID	7
1.1. Tootmiseseadmed madalpingevõrgus	7
1.1.1. Varugeneraatorid.....	7
1.1.2. Mikro- ja väiketuulikud.....	7
1.1.3. Päikesepaneelid	8
1.2. Madalpingeliinid ja -kaablid	11
1.3. Kompenseerimisseadmed.....	13
1.4. Madalpingetarbijad.....	15
1.4.1. Tööstustarbijate arvutusliku võimsuse määramine	15
1.4.2. Elamute arvutusliku võimsuse määramine	16
1.5. Jaotusalajaam	19
2. MUDELI LOOMINE.....	21
2.1. Võrgu liigi valik	21
2.2. 10/0,4 kV trafode valik.....	23
2.3. Kaablite ja liinide valik	25
2.4. Lülitite ja jaotuslattide valik.....	29
2.5. Tarbijate parameetrite valik	31
2.5.1. Elamud	31
2.5.1. Tööstused	31
2.6. Tootmiseseadmete parameetrite valik.....	32
3. MUDELI ANALÜÜS	33
KOKKUVÕTE.....	38
KASUTATUD KIRJANDUS	39
LISAD	41
Lisa 1. Madalpingevõrgu õppemudeli seadmed koos põhiparameetritega	42
Lisa 2. Madalpingevõrgu õppemudeli lühisvoolud	43
Lisa 3. Madalpingevõrgu õppemudeli seadmete nimivoolud ning tegelikud voolud	44
Lisa 4. Madalpingevõrgu õppemudeli võimsusvood	45
Lisa 5. Programmi Simaris Design õppevahendina kasutamise juhend.....	46
Lisa 6. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	48

SISSEJUHATUS

Energiakasutusest moodustab suure osa elektrienergia. Kogu elektrisüsteem jaguneb tema normaalpinge järgi kolmeks – kõrgepinge, keskpinge ja madalpinge, seejuures põhi- ja ülekandevõrk talitleb peamiselt kõrgepingel ning jaotusvõrk kesk- ja madalpingel. Eestis on elektrienergia suurtootjad ühendatud põhivõrku, mis talitleb kõrgepingel 110...330 kV ja kuhu on ka ühendatud suuremad elektritarbijad. Elektrienergia jaotatakse suurematesse asulatesse läbi keskpingevõrgu, mis talitleb pingel 6...35 kV. Väiksemate tarbijateni jõuab elekter pingel 400 V.

Enamik elektrienergiast tarbitakse madalpingel, $s.t < 1$ kV. Seega on elektrilaisikul äärmiselt oluline mõista madalpingevõrgu toimimist, osata määrata selle elementide parameetreid ning sobitada neid ühtseks süsteemiks.

Ülikoolide õppekavade pideva sisulise mahu kasvu tõttu, ei ole energieetikat õppivatel tudengitel lihtne omandada head ülevaadet elektrisüsteemi toimimisest. Tehnoloogia laialdane kasutus õppeprotsessis pakub palju võimalusi erinevate süsteemide mõistmiseks visuaalsel teel. Teema „Madalpingevõrgu lihtsustatud digitaalne mudel õppevahendina“ on valitud eesmärgiga lihtsustada ning moderniseerida elektrotehnika-alast õpet. Samuti valmistab modelleerimistarkvara kasutamine õppetöös tudengeid ette tööturul valitsevaks konkurentsiks, mis nõuab erinevate tarkvarade kasutamise oskust.

Antud töö eesmärgiks on uurida madalpingevõrgu elemente ning nende abil luua digitaalne õppemudel, mida saavad kasutada oma õppes energiakasutuse tudengid. Töö koostamisel on kasutatud vabavaralist tarkvara Simaris Design, mille on loonud tehnoloogia suurkontsern Siemens just madalpingevõrkude disainimiseks. Kuna tegemist on vabavaralise tarkvaraga, saavad seda kasutada nii tudengid iseseisvaks õppimiseks kui ka ülikoolid loengutes võrgu elementide tutvustamiseks.

Käesolev töö on jagatud kolmeks osaks. Esimene osa annab ülevaate madalpingevõrgu elementidest ning nende tähtsusest võrgus. Teises osas on esitatud madalpingevõrgu mudeli

koostamiseks tehtud seadmete valik ning nende parameetrite arvutused. Kolmandas osas on antud ülevaade mudeli koostamisest ning tarkvarast saadav info.

Programmi Simaris Design on võimalik alla laadida Siemensi kodulehel <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/simaris/simaris-design.html>.

1. MADALPINGEVÕRGU ELEMENDID

1.1. Tootmisseadmed madalpingevõrgus

1.1.1. Varugeneraatorid

Mitmed majapidamised ning tööstused kasutavad võrgus toimuvate elektrikatkestuste korral varugeneraatoreid ehk avariigeneraatoreid. Kusjuures eramud kasutavad enamasti käsitsi käivitatavaid ehk elektristarteriga ning tööstustarbivad täisautomaatseid generaatoreid. Enamasti kasutatakse sisepõlemismootoriga diisel- või bensiinigeneraatoreid, nende lihtsama esituse ning käitamise tõttu. Vähem on kasutusel ka gaasigeneraatorid. Bensiinigeneraatori hind on tavaliselt odavam kui diiseligeneraatoril, kuid viimase tarbitav kütus on odavam ning koguselt on seda vähem tarvis [10].

Pikema tööeaga diiseligeneraatorite pöörlemiskiirus on 1500 p/min ning väiksematel 3000 p/min. Suurem pöörlemiskiirus tekitab ka suuremat müra. Odavamad generaatorid vajavad ka mehaanilist pinget ja voolu parameetrite reguleerimist, kontrollides mootori pöörlemiskiirust. Viimane võib tekitada pinget kõikumise probleeme majapidamises või tööstuses, kus koormus muutub suurtes vahemikes. Sellele on alternatiiviks digitaalse pingekontrolleriga generaator [10].

1.1.2. Mikro- ja väiketuulikud

Taastuvenergia laialdasema kasutuse tõttu on tuulegeneraatorite kasutamine elektri tootmiseks muutunud üha populaarsemaks. Lisaks suurtele mitmesaja megavatistele tuuleparkidele rajatakse ka kodumajapidamistesse üksikuid tuulikuid võimsusega kuni 15kW. Sealhulgas eristatakse mikro- ja väiketuulikuid, mille väljundvõimsus ulatub 1,5 kW-ni ning väiketuulikuid, mille väljundvõimsus jääb vahemikku 1,5...15 kW [20].

Tuuleturbiini tööpõhimõte on tuule kineetilise energia muundamine mehaaniliseks pöörlemisenergiaks. Tuuleturbiin koosneb tiivikust, mis omakorda koosneb tiibadest, nabast ning tiibade pöörlemismehhanismist. Tiiviku võlli laagerdus asub gondlis, kuhu kuuluvad veel elektrigeneraator koos abiseadmetega, gondli pöörlemismehhanism ning reduktor, mis võib ka puududa. Gondel toetub omakorda torutaolisele mastile. Tiivikul on üldjuhul kolm tiiba ning tiiva tipu joonkiirus on 6 kuni 8 korda suurem tuule kiirusest. Turbiini nimi pöörlemiskiirus jääb vahemikku 20...40 l/min [8].

Tuuleenergia lahendus võib olla kas on-grid ehk elektrivõrku ühendatult või off-grid ehk elektrivõrku ühendamata. On-grid süsteem tähendab, et tuulik on ühendatud otse elektrivõrku ning kui tarbimine on suurem kui tuulegeneraatori toodang, siis saab tarbija puudujääva võimsuse elektrivõrgust. Samuti kui tuulegeneraatori toodang on suurem kui kohalik tarbija suudab ära kasutada, siis müüakse ülejäänud võimsus võrku. Elektrienergiat on-grid süsteemi puhul ei salvestata. Off-grid süsteemi puhul ei ole tuulikul otsest ühendust elektrivõrguga. Kui tootmine on suurem kui tarbimine, salvestatakse ülejäänud energia akupanka ning sealt tarbitakse salvestatud energiat kui tuulik ei tooda tarbimiseks piisavalt võimsust [1].

Eesti Tuuleenergia Assotsiatsiooni andmeil liigitatakse väiketuulikuks kõiki tuulikuid kogukõrgusega kuni 30 meetrit. Väiketuulikud võivad olla nii on-grid kui ka off-grid. Tuuliku paigaldamisel tuleb lähtuda vajalikust asukoha keskmisest miinimum tuulekiirusest, mis võrku ühendatud tuuliku puhul algab 4,5 m/s. Optimaalne tuulekiirus väiketuulikule on 5-6 m/s [3].

1.1.3. Päikesepaneelid

Päikeseenergia on taastuva energiaallikana muutunud aastatega ühe populaarsemaks. Peamiselt kasutatakse päikeseenergiat otseselt ruumide kütmiseks ning valgustuseks. Laialdaselt kasutatakse aga päikeseenergiat ka elektri tootmiseks, seda peamiselt fotoelementide abil. Fotoelement on elektrooniline seade, mis kasutab valguskvante ehk footoneid, et toota elektrienergiat, s.t muundab footonite energia elektrienergiaks. Päikesepatarei põhineb ventiilfotoefektil, selle elemendid kinnitatakse paneelidele ning ühendatakse patareiks. Peamiselt valmistatakse fotoelemente ränist, mida omakorda

toodetakse kvartslüüvast. Täna jääb fotoelementide kasutegur 20% ringi, kuid nanotehnoloogia kiire areng ennustab juba lähitulevikus kasuteguri tõusu 60%-ni [6].

Päikesepaneele valmistatakse täna põhiliselt kolme tehnoloogia järgi.

1. Monokristalliline räni-element kasutab ühte pidevat räni kristallvõre. Selline tehnoloogia suudab saavutada kasuteguri 14-15%, mõned isegi 20%. Keeruka tootmisprotsessi tõttu on nende hind püsinud aga kõrgem näiteks kilepäikeseelemendist. See probleem on viimastel aastatel aga leidnud osaliselt lahenduse, kuna suurenenud tootmismahud on toonud nende hinda alla. Monokristallilise räni-element tehnoloogia eeliseks on ka tema võimsuse väike vähenemine temperatuuri tõustest – temperatuurikoefitsient 0,4-0,5 %/°C. See tehnoloogia on ka kõige levinum eramute päikesepaneelide lahenduses [7].
2. Polükristalliline räni-element tehnoloogia puhul kasutatakse arvukaid monokristallilisi räniosakesi. Sellest moodustunud polükristall valatakse kokku ning lõigatakse õhukesteks plaatideks. Plaatidest moodustatakse element. Selline tehnoloogia on odavam, kui monokristallitehnoloogia, kuna tootmisprotsess on lihtsam. Kasutegur on neil 13-15%. Omahind on neil suhteliselt madal ning seega on need laialdaselt kasutusel nii eramutes kui ka tööstustes [7].
3. Kõige odavama variandina kasutatakse õhukest kile-elemente. Kuigi kristall-elementid on suurema kasuteguriga, siis kile-elementid on suurema tootlusega, s.t tootavad rohkem energiat oma nimivõimsuse kohta. Viimane kehtib eriti suurte temperatuuride kohta, kus kile-elementi võimsuskaod on väiksemad. Seega on kile-elemente mõistlikum kasutada soojema kliimaga paikades. Lisaks on nende tootmiskulud madalad, seega ka omahind madal [7].

Päikeseelektrijaam on Päikese kiirgusenergia muundamisel põhinev elektrijaam. Fotoelemendid muundavad päikeseenergia päikesepatareide abil otse elektrienergiaks. Palju kasutatakse aga mitmeastmelist muundamist – süsteemi kuulub kiirgusvastuvõtja, aurugeneraator ja turbiinigeneraatoragregaatidest. Töö põhimõtte järgi jagatakse need fotoelektrilisteks-, rennpeegel- ja tornpäikeseelektrijaamadeks [6].

Madalpingevõrgus vaatlame peamiselt hoonete juurde kuuluvaid päikesepaneele kuni 12 kW-se koguvõimsusega ühe eramu kohta.

Päikesepaneelidel kasutatakse sarnaselt tuulegeneraatoritele kas *on-grid* või *off-grid* süsteemi. Vahelduvvoolu saamiseks ühendatakse elektrisüsteemi ning päikesepaneeli vahele inverter, mis muundab alalisvoolu vahelduvvooluks. Inverteri kasutegur leitakse võimsusuhtena [7]

$$\eta_{inverter} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{U_{AC} \cdot I_{AC} \cdot \cos \varphi}{U_{DC} \cdot I_{DC}} \quad (1.1.)$$

kus $\eta_{inverter}$ on päikesepaneeli inverteri kasutegur;

P_{out} – väljundvõimsus W;

P_{in} – sisendvõimsus W;

AC – vahelduvvool;

DC – alalisvool;

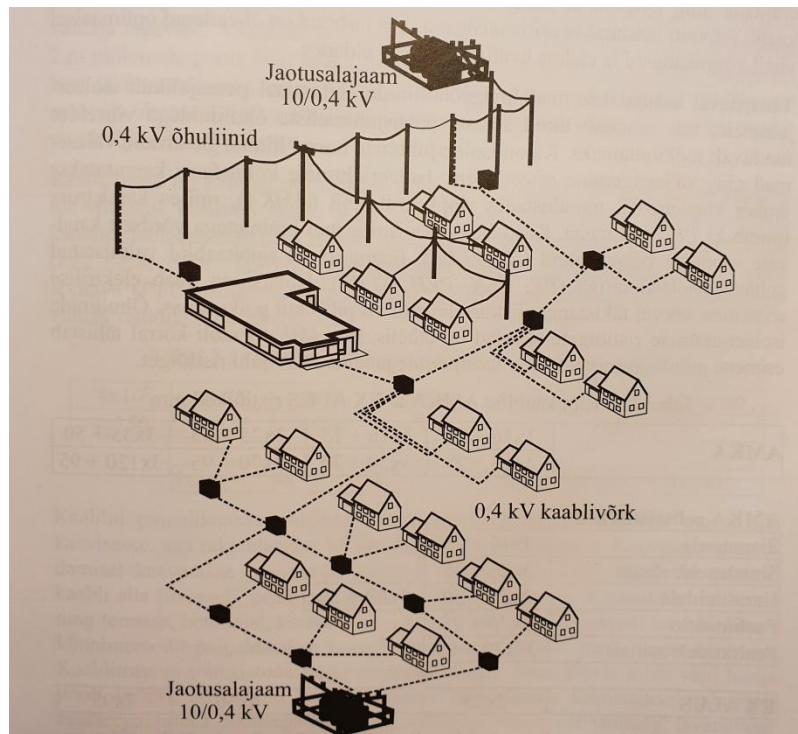
U – nimipinge V;

I – nimivool A;

$\cos \varphi$ – võimsustegur.

1.2. Madalpingeliinid ja -kaablid

Madalpingevõrgu elektripaigaldiste puhul on oluliseks osaks ka elektriliinid. Jaotusalaajaamast tarbijani juhitakse elekter nii õhuliinide kui ka maakaablite abil. Liini valik sõltub peamiselt asustustihedusest. Joonis 1 selgitab täiendavalt madalpingevõrgu kontseptsiooni [8].



Joonis 1. Õhu- ja kaabelliinidega madalpingevõrk [8].

Õhuliinid, nagu nimigi viitab, asuvad õhus ning toetuvad kindlate vahemaade tagant püstitatud mastidele. Madalpingeõhuliine eelistatakse kaabelliinidele nende odavuse, paigaldamiskiiruse ja remonditavuse tõttu. Hõreda asustustihedusega piirkondades (peaasjalikult maapiirkondades) on õhuliinide kasutamine mõistlik, kuna ei sega elukeskkonda. Madalpingeõhuliinide ehitamisel kasutatakse enamasti isoleerjuhtmeid, sest need on töökindlamad ja esteetilisema väljanägemisega. Isoleeritud õhuliini rippkeerdkabel moodustatakse kolme isoleeritud faasijuhtme keerutamisega ümber kandetrossi. Kandetross täidab ka PEN-juhtme funktsiooni. Isolatsiooni juures on oluline ka niiskuse leviku takistamine [8].

Tihedama asustustiheduse korral kasutatakse elektrienergia ülekandeks maa-aluseid kaabelliine. Enamasti kasutatakse alumiinium- või vasksoonega kaablid, isoleermaterjaliks ekstrueeritud polüvinüülkloriid (PVC) ja polüeteen [8].

Tabelis 1 on toodud erinevate õhu- ja kaabelliinide parameetrid.

Tabel 1. Õhu- ja kaabelliinide parameetrid [8]

Juhtme mark	Aktiivtakistus +20°C juures Ω/km	Reaktiivtakistus Ω/km	Lubatud vool +25°C juures A	Mass kg/km
A 4x70	0,44	0,81	170	191
A 4x95	0,33	0,79	200	257
AMKA 3x70+95	0,44	0,10	180	990
AMKA 3x120+95	0,36	0,09	275	1400
EX ALUS 4x50	0,37	0,06	110	700
EX ALUS 4x70	0,26	0,06	140	1000
AMCMK 3x185+95	0,16	0,08	330	3700
AMCMK 3x240+72	0,13	0,07	375	4100
AXCMK 3x185+57	0,16	0,07	330	2900
AXCMK 3x95+21	0,32	0,08	220	1750

1.3. Kompenseerimisseadmed

Elektriline võimsus koosneb kahest komponendist: aktiivvõimsusest ja reaktiivvõimsusest. Aktiivvõimsus on enamik elektritarvitite poolt tarbitav võimsus. Aktiivvõimsusest saab elektrienergia, mida saab muundada kasulikuks tööks.

Reaktiivvõimsus on elektrilise võimsuse osa, mida tarbivad elektrimootorid, trafod ning teised magnet- ja elektrivälju kasutavad seadmed elektri- ja magnetväljade loomiseks. Reaktiivvõimsuse ülekanne suurendab liinides ja trafodes võimsuskadusid ning seetõttu püütakse selle tarbimist vähendada ehk kompenseerida. Reaktiivvõimsuse ringlemine elektrivõrgus koormab vahelduvvoolu generaatoreid, liine ja trafosid elektrivooluga, mis ei tee kasulikku tööd ning seega ei saa sellega ülekoormatud seadmeid kasutada kasuliku võimsuse edastamiseks [19].

Reaktiivvõimsust madalpingevõrgus kompenseeritakse püsilülituses kondensaatoritega või automaatsete kondensaatorseadmetega. Suuremad reaktiivvõimsuse tarbijad on asünkroonmootorid ja trafod. Induktiivtakistusega vahelduvvoolu elektriseade, näiteks elektrimootor, tarbib alati reaktiivenergiat. Kondensaatori lülitamisel võrku vabaneb toiteallikas ja elektrivõrk reaktiivenergia tarbimisest [19].

Tarbijatel on mõistlik reaktiivvõimsust kompenseerida järgnevatel põhjustel:

- väiksemad voolud kaablites ja trafodes kuni 30% võrra, kuna väheneb voolu reaktiivkomponent vähendamata aktiivkomponenti;
- ettevõtetel väiksemad reaktiivenergia kulud, mis vähendab elektriarvet, tarbimise vähenemine on tavaliselt 4-6-kordne võrreldes olukorraga, kus kompensatsioon puudub;
- väiksemad pingelangud liinides ja trafodes, s.t toitepinge on stabiilsem;
- väiksemad võimsuskaod, sest liinides ja trafodes ei kanta üle reaktiivvõimsust [19].

Reaktiivvõimsuse kompenseerimine on oluline ka jaotusvõrgule, sest siis ei koormata võrku voolu reaktiivkomponendiga. See tähendab, et võrgu läbilaskevõimsus on suurem ning võimsuskaod võrgus väiksemad. Kompenseerimata kujul toodetakse reaktiivvõimsust ainult

elektrijaamades, mis ei taga kogu elektrisüsteemi vajadusi. Reaktiivvõimsuse tarbimine mõjutab jaotusvõrgus ka pingeniivoosid [19].

Reaktiivvõimsuse kompenseerimisega võib kaasneda ka probleeme. Põhilisteks probleemideks on:

- kõrge pingeniivoo, mis tekib eriti olukorras, kus võrgupinge on nimipinge lähedane või sellest suurem. Kondensaatorite sisselülitamine tõstab võrgus pinget, mida suurem on kondensaatorite võimsus ja trafo näivtakistus. Pingetõus võib ulatuda kuni 5%-ni. Kõrgenenud pinget võib omakorda kaasa tuua suuremad võimsuskadod mootorites ja trafodes võrgus suurema aktiivvõimsuse tarbimise tõttu;
- kondensaatorite sisselülitamisega tõuseb harmooniliste moonutuste tase nii toitevoolus kui ka toitepinges. Kõrgem harmooniliste moonutuste tase põhjustab võimsuskadusid mootorites, trafodes, kaablites ja kondensaatorites;
- kondensaatorite sisselülitamisel esinevad pinges ja voolus siirdeprotsessid, s.t kiired voolu ja pinget sumbuvad võnkumised väga suure sagedusega vahemikus 300...1000 Hz. Sellised võnkumised põhjustavad mitmeid häiringuid süsteemis. Nende mõju vähendamiseks saab kasutada näiteks drosseleid kondensaatorite ahelas või kontakteid lisatakistitega. Probleem on suurem pingel 6...10 kV ja suure võimsusega kondensaatorite lülitamisel madalpingel [19].

Reaktiivvõimsuse ülekandmine tekitab aktiivvõimsuse kadusid aktiivtakistuses R ja reaktiivvõimsuse kadusid reaktiivtakistuses X . Aktiivvõimsuse kaod avalduvad järgmiselt [19]

$$\Delta P = 3I^2R = 3I_A^2R + 3I_R^2R \quad (1.2.)$$

kus ΔP on aktiivvõimsuskaod W ;

I – voolutugevus A ;

R – aktiivtakistus Ω ;

I_A – voolu aktiivkomponent A ;

I_R – voolu reaktiivkomponent A .

Seega koosnevad aktiivvõimsuskaod järgmistest komponentidest [19]

$$\Delta P = \Delta P_P + \Delta P_Q = R \frac{P^2}{U^2} + R \frac{Q^2}{U^2} \quad (1.3.)$$

kus ΔP_P ja ΔP_Q on aktiivvõimsuskaod aktiiv- ja reaktiivvõimsuse ülekandmisest W.

1.4. Madalpingetarbijad

1.4.1. Tööstustarbijate arvutusliku võimsuse määramine

Madalpingevõrgu projekteerimisel on oluline teada projekteeritava võrgu tulevast koormust. Lihtsamal juhul on võrgus ainult üks tarbija ning sel juhul on arvutuslik võimsus võrdne paigaldatud võimsusega. Enamasti on aga madalpingevõrgus väga palju tarbijaid nii hoonete kui ka üksikute tarvitite näol. Koormusarvutusteks rühmitatakse tavaliselt tarvitid. Tööstustarbijate arvutuslikku võimsust saab määrata nõudlusteguri meetodiga [8].

Nõudlusteguri meetodi puhul määratakse arvutuslik võimsus iga tarbija installeeritud võimsuse ja nõudeteguri korrutiste summana [8]

$$P_a = \sum_{l=1}^n k_n \cdot P_p \quad (1.4.)$$

kus k_n on nõudlustegur ja P_p paigaldatud võimsus W.

Nõudlustegur on tööstustarbijatele vahemikus 0,15...0,95. See koosneb samaaegsustegurist k_t , mis arvestab, et kõik tarvitid ei ole korraga sisse lülitatud, kasutustegurist k_k , mis arvestab, et ühtegi tarvitit ei kasutata pidevalt, ja maksimumteguri k_m , mis arvestab, et kõik tarvitid ei talitle täisvõimsusel [8]

$$k_n = k_t \cdot k_k \cdot k_m \quad (1.5.)$$

Vaadeldavad tegurid sõltuvad erinevatest asjaoludest ja neid saab hinnata vastava teabekirjanduse põhjal. Tõenäosusteooriast lähtudes on tuletatud seos maksimumteguri jaoks sõltuvalt tarvitite arvust n ja kasutustegurist k_k . Kuna tarvitid on erinevate nimivõimsustega ja osakaaluga tarbimise, siis lähtutakse tarvitite efektiivsest arvust n_e , mis leitakse valemiga [8]

$$n_e = \frac{(\sum_{i=1}^n P_{ni})^2}{\sum_{i=1}^n P_{ni}^2} \quad (1.6.)$$

kus P_{ni} on i-nda tarviti nimivõimsus W.

Maksimumtegur avaldub [8]

$$k_m = 1 + \left(\frac{1}{k_k} - 1\right) \cdot \left[b + (1 - b) \cdot e^{\frac{1-n_e}{b}}\right] \cdot n_e^{-0,75} \quad (1.7.)$$

kus $b = 2,6 \cdot \sqrt{k_k}$.

Kui nõudlustegurid on leitud tarvitirühmadele, siis ei saa tarbija summaarset koormust leida summeerimise teel, vaid tuleb lähtuda summaarsest nõudlustegurist [8]

$$k_n = \frac{\sum_{i=1}^m k_{ni} P_{pi}}{\sum_{i=1}^m P_{pi}} \quad (1.8.)$$

kus m on rühmade arv.

Valgustusseadmete arvutuslik võimsus leitakse erivõimsusest lähtudes [8]

$$P_a = pA \quad (1.9.)$$

kus p on valgustuse erivõimsus pinnaühikule W/m^2 ja A valgustatava ruumi pindala m^2 .

1.4.2. Elamute arvutusliku võimsuse määramine

Elamutes on palju elektritarviteid, mis kõik tarbivad elektrivõimsust. Tarbitavat võimsust on lihtne määrata ühe tarviti puhul – see on toodud tavaliselt konkreetse seadme sildil või kasutusjuhendis. Enamjaolt on vaja aga määrata mitmete tarvitite poolt tarbitavat võimsust. Elamus kõikide tarvitite poolt tarbitav võimsus moodustab paigaldatud võimsuse ehk installeeritud võimsuse. Kuna kõiki tarviteid ei lülitata võrku samaaegselt, on oluline teada tarbitavat võimsust, mis näitab kui palju tarbija võrgust elektrit tarbib. Tarbitava võimsuse arvutamisel tuleb arvesse võtta nii elektritarvitite samaaegsustegurit, kasutegurit kui ka maksimumtegurit [19].

Kõigi eelpool nimetatud tegurite väärtused on tavaliselt vahemikus 0,3...0,7 ning jäävad alati alla ühe. Teguri suurus sõltub elamu suurusest või konkreetsest seadmest. Tegurite määramiseks on aga vaja teada elamu installeeritud võimsust, mis projekteerimisel ei ole teada. Kuna installeeritud võimsus on oluline alajaama, toiteliini ning liitumiskilbi valikutel, on tarvis arvutada eeldatav tarbitav võimsus ligikaudselt pinna suuruse kaudu [19].

Ligikaudsed arvutused teostatakse lähtudes kolmest olukorrast:

- üksikelamu toide;
- elamurühma toide;
- elu- ja muude hoonete ühistoide [19].

Üksikelamu puhul saab ligikaudse arvutusliku võimsuse leida valemiga [19]

$$P_a = pA + P_0 \quad (1.10.)$$

kus P_a on üksikelamu arvutuslik võimsus W;

A – elamu kasulik pind m^2 ;

p – erivõimsus kW/m^2 ;

P_0 – hoone liiki iseloomustav lisavõimsus W.

Elamurühmaks loetakse üheliigiliste elamute rühma. Eriliigilised elamud jaotatakse aga tema liigi järgi eri rühmadesse. Põhikoormuseks võetakse suurima tarbimisega rühm ning sellele liidetakse teiste elamurühmade koormused koos liitumisteguriga. Lisavõimsus P_0 valitakse summeeritavate hoonete arvutuslike lisavõimsuste hulgast suurim. Arvutusliku võimsuse leidmise valem kujuneb seega järgmiseks [19]

$$P_a = P_p A_p + a_1 p_1 A_1 + \dots + a_n p_n A_n + P_{0max} \quad (1.11.)$$

kus p_p ja A_p on põhikoormuse erivõimsus ja kasulik pind,

$p_1 \dots p_n$ ja $A_1 \dots A_n$ on samad näitajad teiste liidetavate tarbimisrühmade kohta,

$a_1 \dots a_n$ on liitumistegurid,

P_{0max} on summeeritavate hoonerühmade suurim lisavõimsus W.

Tabelis 2 on esitatud parameetrite p ja P_0 ligikaudsed väärtused mõnede elamutüüpide jaoks.

Tabel 2. Elamute arvutusliku võimsuse määramise tegurid [19]

Rühm	Hoone liik	Pliidi liik ja elekterkütte kasutamine	A≤1500		A<1500	
			P, kW/m ²	P ₀ , kW	P, kW/m ²	P ₀ , kW
1.1	Korruselamu	Tahkekütuse- või balloongaasipliit	0,016	25	0,009	36
1.2		Maagaasipliit	0,012	25	0,007	32
1.3		Elektripliit ilma elektrikeriseta	0,032	30	0,016	54
1.4		Elektripliit ja elektrikeris	0,050	30	0,024	69
2.1	Suveelamu	Tahkekütuse- või balloongaasipliit	0,010	12	0,008	15
2.2		Elektripliit ja elektrikeris	0,026	12	0,024	15
3.1	Ridaelamu	Tahkekütuse- või balloongaasipliit	0,012	30	0,008	36
3.2		Elektripliit ja elektrikeris	0,028	30	0,024	36
3.3		Elektripliit, elektrikeris, otselekterküte ja – kuumaveevarustus	0,070	30	0,060	45
3.4		Elektripliit, elektrikeris, salvestuselekterküte ja - kuumaveevarustus	0,200	45	0,180	75
4.1	Eramu	Tahkekütuse- või balloongaasipliit	0,010	12	0,010	12
4.2		Elektripliit ja elektrikeris	0,028	12	0,024	18
4.3		Elektripliit, elektrikeris, otselekterküte ja – kuumaveevarustus	0,070	12	0,060	27
4.4		Elektripliit, elektrikeris, salvestuselekterküte ja - kuumaveevarustus	0,200	18	0,180	48
5.1	Maaelamu	Tahkekütuse- või balloongaasipliit	0,008	12	0,008	12
5.2		Elektripliit ja elektrikeris	0,024	12	0,020	18
5.3		Elektripliit, elektrikeris, otselekterküte ja – kuumaveevarustus	0,060	12	0,050	27
5.4		Elektripliit, elektrikeris, salvestuselekterküte ja - kuumaveevarustus	0,200	18	0,180	48

1.5. Jaotusalajaam

Eestis on madalpingetarbijate kolme faasiline võrgupinge tavaliselt 400 V. Mida madalam on pinge, seda suuremad on pinge- ja võimsuskadod pikkade vahemaade puhul. Et hoida kaod võimalikult väiksed on elektrivõrgud varustatud alajaamadega, mis vastavalt elektri üle kandmisele ja jaotamisele teatud vahemaa tagant alandab võrgupinget läbi trafode. Elektrienergia ülekanne suurte vahemaade taha toimub kõrgepingel, mille suurusteks Eesti elektrivõrgus on 6...330 kV. Seejuures elektrienergia põhivõrku jäävad pinged on 110/330 kV ning jaotusvõrgus on 6/10/15/35 kV. Läbi jaotusvõrgu jõuab elektrivõimsus tarbijani liinipingel 400 V [8].

Jaotusalajaamad on enamasti kinnised komplektalajaamad või lahtised mastalajaamad. Komplektalajaamad on levinud linnapiirkondades ning need on teisaldatava metallkonstruktsiooniga. Maapiirkondades kasutatakse enamasti mastalajaamu. Viimaste trafod on tugevdatud isolatsiooniga. Jaotusalajaamas on oluline määrata pinget muutva trafo võimsus, mis sõltub konkreetse alajaama tarbijatest. Seega on oluline määrata trafo parameetrid vastavalt konkreetsete tarbijate aktiivvõimsuse vajadusega [8].

Liinide lülitamiseks jaotusalajaamas kasutatakse koormuslüliteid, trafo lülitamiseks võimsuslülitit. Jaotusalajaama madalpingepoolele väljuvate fiidrite lahtrites on jadamisi vinnaklülitid ja sulavkaitsmed [8].

Alajaamades on pinge alandamiseks ning seega võimsuskadude vähendamiseks trafod. Sama võimsusvoo ülekande puhul erinevatel pingetel on tarvis erineva ristlõikega ülekandeliine. Kaod ülekandeliinis on võrdsed voolu ruudu ja võrdelised takistusega. Koormusvoolu kasvades kasutatakse suurema ristlõikega juhtmeid, kaableid ja liine. Jaotusvõrgu trafode primaarpinge on vahemikus 6...20 kV ja sekundaarpinge 0,23...0,4 kV. Alajaamad paigaldatakse koormuskeskmesse võimalikult kõrgel pingel, sest nii vähenevad oluliselt kaod võrgus [19].

Tarbija võidakse ühendada võrguga kas liitusmispunktis või maapiirkondades mastalajaama kaudu, kust edasi jõuab ühendus tarbija elektrikilpi [19].

Enamik kodumajapidamisi tarbib elektrit pingel 230 V, s.t ühte faasi. 400 V kasutavad kolmefaasilist pinget nõudvad tarvitid, milleks on tavaliselt suure nimivõimsusega elektriseadmed [19].

2. MUDELI LOOMINE

2.1. Võrgu liigi valik

Elektrivõrgu moodustavad erinevad sõlmpunktid. Elektrivõrke jagatakse laias laastus suletud võrkudeks ja avatud võrkudeks. Avatud võrgu puhul on üks põhitoiteallikas ühendatud ühe võrgu sõlmega. Avatud võrgul puuduvad suletud kontuurid. Tee toiteallikast tarbijani on üks ning puuduvad mitmed erinevad teed võimsuse ülekandeks. Kuna avatud võrgus puuduvad paralleelharud, siis on lühisvoolud võrgus väiksemad. Avatud võrgud jagunevad omakorda radiaal- ja magistraalvõrkudeks [9].

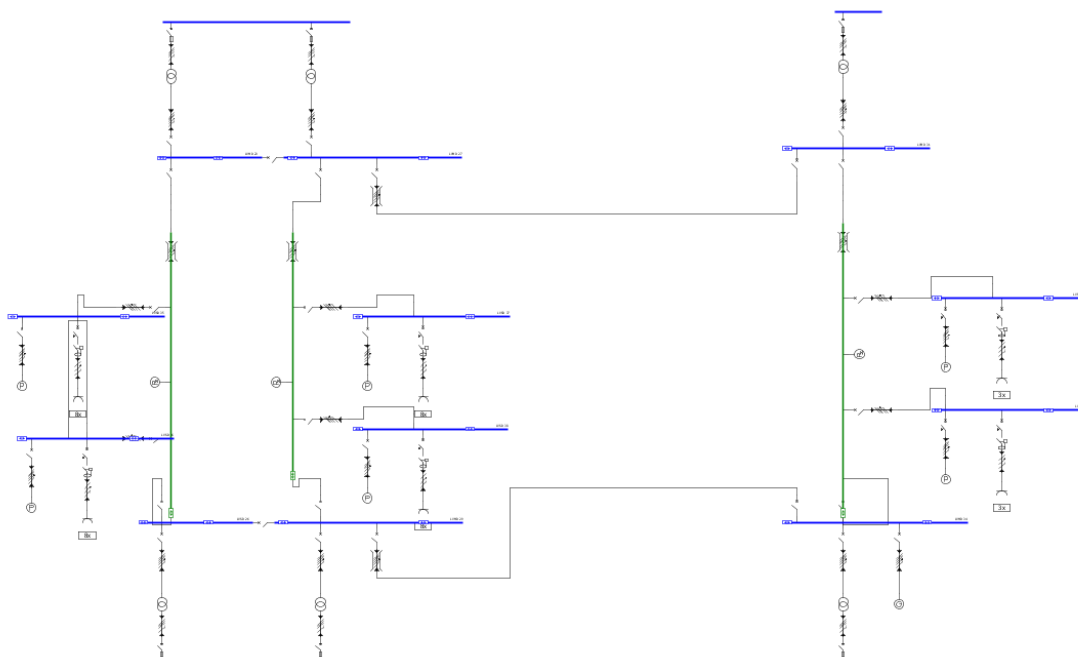
Radiaalvõrk koosneb radiaalliinidest. Võrgu astmete arv võrdub järjestikuste ühendatud kaitseseadmete maksimaalse arvuga. Astmeid on tavaliselt kolm-neli. Mida vähem on astmeid, seda suurem töökindlus. Magistraalvõrk koosneb omakorda magistraalliinidest, mis saavad olla kas ühe- või kaheastmelised. Magistraalvõrk on võrreldes radiaalvõrguga odavam, sest kulud seadmetele ja materjalidele on madalamad. Magistraalvõrgu puhul on aga töökindlus madalam ning seda puudust kompenseeritakse reservliinidega [9].

Suletud võrgu puhul moodustavad liinid ühe või mitu suletud kontuuri. Suletud võrgu puhul saavad tarbijad toite mitmest allikast mitmet teed pidi. Suletud võrgu puhul on võrguga seotud arvutused, näiteks lühisvoolude leidmine või võimsuskaod, oluliselt keerulisemad. Suletud võrgus on lühisvoolud suuremad. Samas on suletud võrgus suurem töökindlus ning väiksemad kaod [9].

Suletud võrke saab omakorda jaotada ring- ja silmusvõrkudeks. Ringvõrgu puhul jookseb toitealajaama trafost kaks liini jaotusvõrgu trafodeni, mida tavaliselt on kaks ning mis on omavahel ühendatud selliselt, et oleks võimalik tagada klientidele reservtoidet ühe trafo rikked. Silmusvõrgu puhul on jaotusvõrgu trafosid rohkem kui kaks ning nad toidavad erinevaid piirkondi, olles samal ajal ühenduses üksteisega reservtoiteks. Trafode paralleelis töötamine tagab ka võimsuse ühtlasema jaotuse seadmete vahel. Suletud võrkude miinuseks on keeruline ning tavaliselt kallim releekaitse [8].

Mudeli koostamiseks kasutatud programm Simaris Design on Saksamaa tehnoloogiakontserni Siemensi poolt loodud madalpingevõrgu modelleerimisprogramm. Simaris Design programmiga on võimalik projekteerida nii madalpingevõrku jaotusvõrgu osana kui ka näiteks üksiku hoone või tehase elektriskeemi koostamisel. Simaris Design arvutab loodud mudeli võimsusvood, lühisvoolud ning kaitseseadmete selektiivsuse, võimalik on uurida võrku erinevates töörežiimides.

Simarise õppemudeli jaoks on autor valinud silmusvõrgu skeemi, kuna selline mudel annab kõige parema ülevaate laialdaselt kasutatava võrgukontseptsiooni võimalustest. Joonisel 2 on näha programmis Simaris Design loodud ringvõrgu näidismudel.



Joonis 2. Kuue trafoga silmusvõrgu mudel programmis Simaris Design.

2.2. 10/0,4 kV trafode valik

Kuna Simaris Design on Siemensi kontserni loodud võrgumodelite projekteerimise programm, siis kõiki seadmeid võrgus saab valida Siemensi kataloogist. Madalpingevõrgu modelis on olulisel kohal ka jaotusvõrgu keskpinge võrk ja seda just jõutafode primaarmähise nimipinge määramisel. Simarise nõutud transformaatori parameetrid on esitatud joonisel 3.

Field	Value
Designation	Transformer 23.1
Manufacturer	SIEMENS
Type	Oil-immersed type transformer
Product	FITformer
Vector group	Dyn1
Fan mounted	No
Rated power S_n [kVA]	250
Rated short-circuit voltage ukr [%]	4
Short-circuit losses P_k [kW]	2.35
No-load loss P_0 [kW]	0.27

Buttons: OK, Cancel

Joonis 3. Trafo parameetrite määramine Simaris Design'is.

Jaotusvõrgus kasutatakse enamjaolt kahte tüüpi trafosid – kuivisolatsiooniga ja õliisolatsiooniga. Tavaolukorras kasutatakse õlitrafosid, kuna need on odavamad ning laialdasemalt levinud. Kuivisolatsiooniga trafosid kasutatakse tavaliselt tuleohtlikes keskkondades, kuna tema põlemiskoormus on väiksem kui õliisolatsiooniga trafodel [14].

Siemens AG pakub programmis õliisolatsiooniga trafot Fitformer. Tegemist on reguleeritava trafoga, mis tähendab, et lisaks trafo pingeastmete muutmisele on võimalik muuta astme ja pinge muutumise suhet. See on oluline tänapäevases olukorras, kus trafo järgi võib olla ühendatud mitmeid hajustootmisseadmeid. Hajustootine võib tekitada olukorra, kus võimsus trafo mähistel liigub vastupidiselt – s.t mitte kõrgema pinge poolelt madalamale, vaid madalama pinge poolt kõrgemale. Fitformer trafod tagavad reguleeritavuse ümberlülitamise teel, mis tagab igal juhul nii tarbijatele kui ka väiketootjatele sobiva võrgupinge [16].



Joonis 4. Siemensi Fitformer õlitrafo [16].

Trafode vektorrühm näitab, kuidas on trafo mähised ühendatud. Vektorrühma tähis näitab ühenduse liiki. Y või y on tähtühendus, D või d on kolmnurkühendus ja N või n on neutraal. Simaris pakub oma valikus kolme ühendusviisi – Dyn1, Dyn5 ja Dyn11. Esimene täht näitab primaarmähise ühendust (s.t kõrgema pinge mähise ühendust), teine täht tähistab sekundaarmähise ühendust, kolmas täht näitab neutraalühendust ning number lõpus näitab faasinihet esimese ja teise mähise vahel. Kusjuures number näitab, kui mitu korda 30° on madalpinge mähis nihkes võrreldes kõrgepinge mähisega [12].

Arvestuslik näivvõimsus tuleb määrata vastavalt arvutuslikele trabijatele trafol. Lühispinge, lühiskaod ja tühijooksukaod on esitatud trafo passis ning väärtused on leitud trafo katsetuste tulemusel tehases. Simaris Design valib tavaliselt viimased automaatselt, mis tagab mudeli arvutuste toimimise.

Trafo primaarpinge on 10 kV, kuna selline võrgupinge on Eestis laialdaselt kasutusel. Sekundaarpinge 0,4 kV nagu see jõuab ka Eesti tarbijate kodudesse.

2.3. Kaablite ja liinide valik

Trafod on teiste alajaama seadmetega ühendatud kaablite kaudu. Samuti on vaja määrata kaablite ja liinide parameetreid tarbijate juures. Kaablite parameetrid määratakse Simaris Design'is nagu näidatud joonisel 5.

Nimetus	Designation	
Funktsionaalne vastupidavus	Functional endurance	none
Kaabli tüüp	Type of cable	Multi-core cable or light-plastic sheathed cables
Elektrijuhi materjal	Conductor material	Cu
Isolatsiooni materjal	Insulating material	PVC70
Kaabli disain	Cable designs	e.g. NYY, NYCWY, NYCY, NYKY
Paigaldusviis	Installation type	C
Vähendustegur	Reduction factor f tot	1
Lubatud pingelangus	Permissible voltage drop/section [%]	4
Piirtemperatuurid	Temperatures [°C]	ΔU : 55; Ikmin: 80
Juhtide arv	Number of runs	1
Kaabli/liini pikkus	Length [m]	15
Pikim põlengu ala	Longest fire area [m]	0
Faasi juhi ristlõige	Cross section of phase conductor [mm²]	240
Neutraali ristlõige	Cross section of N conductor [mm²]	240
Kaitsejuhi ristlõige	Cross section of PE conductor [mm²]	120

Buttons: As default, OK, Cancel

Joonis 5. Kaabli parameetrite määramine programmis Simaris Design

Funktsionaalse vastupidavuse alla lähevad erilistes keskkondades kasutatavad kaablid ja liinid. Tavalistest liinidest ja kaablitest erinevad nad enamasti isolatsiooni poolest. Põhiliselt on sellistel kaablitel oluline tulekindlus.

Simaris Design programmis on võimalik valida järgnevaid kaablitüüpe:

- mitmesooneline kaabel,
- soomustatud mitmesooneline kaabel,
- ühesooneline kaabel,
- isoleeritud juht.

Sooned on juhtmetes või kaablites kasutatavad isolatsiooniga kaetud kiulised või massiivsed elektrijuhid. Isolatsioon on enamasti valmistatud polümeermaterjalist. Kohtkindlates juhistiketes on tavaliselt sooned enamasti massiivsed ning jämedakiulised ning teisaldatavates juhtmetes ja kaablites peenekiulised. Kaabli erinevus juhtmest seisneb kaabli sooni ümbritsevas hermeetilises kestas ehk mantlis [18].

Elektrivarustuse töökindluse tagamiseks on kasutusel põhiliselt vaskjuhtmed ja –kaablid. Alumiinium on väikestel ristlõigetel liiga väikese töökindlusega, mistõttu Eestis kehtivad standardid elektripaigaldiste kohta välistavad selle materjali kasutamist [18].

Isolatsiooni materjale on valikus neli: PVC 70, kuumuskindel PVC, XLPE ja EPR. PVC puhul on tegemist ühe vanima plastiga. See on sünteetiline materjal, mis koosneb suurtest polümeermolekulidest. Süsiniku ja vesiniku ühend saadakse tavaliselt naftast või maagaasist [13].

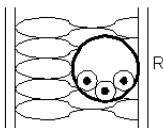
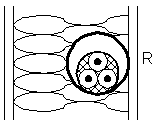
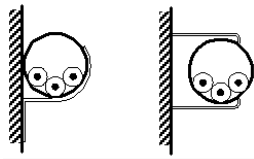
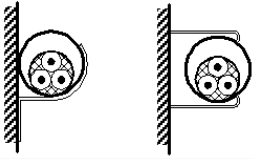
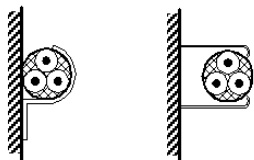

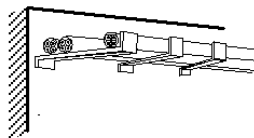
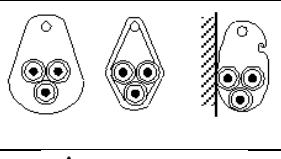
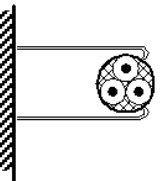
Number 70 tähistab suurimat temperatuuri, mida antud isolatsioon kannatab. Kõrgemate temperatuuride puhul kasutatakse kuumuskindlat PVC isolatsiooni. XLPE puhul on tegemist ristsidemetega polüeteenist jäiga materjaliga, mida kasutatakse palju elamute veetorustikel. XLPE eelis PVC ees on tema võime taluda oluliselt suuremaid pingeid kui PVC. XLPE aga ei ole vastupidav suurtes temperatuurivahemikes [2].

EPR ehk etüleenpropüleenkumm on üks mitmest kummist isoleermaterjal. EPR isolatsioon on laia funktsionaalsusega. EPR-i kasutatakse laialdaselt elektrikaablite isolatsioonimaterjalina tänu oma suurele dielektrilisele tugevusele, kuid seda kasutatakse ka suurepärase osooni- ja ilmastikukindlusega mantelmaterjalina. EPR-il on lai termiline vahemik vahemikus -55°C kuni 150°C . Mehaaniliste omaduste hulka kuulub vastupidavus surumisele, löikamisele, löögile, rebenemisele ja hõõrdumisele [4].

Kaabli disain on esitatud tavaliselt konkreetse kaablitootja kataloogis ning erinevad tootjad toodavad erineva disainiga kaableid.

Juhtmete ja kaablite paigaldusviiside tüüppaigaldusviisid on esitatud tabelis 3.

Tabel 3. Juhtmete ja kaablite tüüppaigaldusviisid [8]

Põhimõte	Kirjeldus	Tähis
	Isoleerjuhtmed soojusisoleerseinas paiknevas torus	A1
	Mitmesooneline kaabel soojusisoleerseinas paiknevas torus	A2
	Isoleerjuhtmed puitseinal paiknevas torus	B1
	Mitmesooneline kaabel puitseinal paiknevas torus	B2
	Ühe- või mitmesooneline kaabel puitseinal	C
	Mitmesooneline kaabel pinnases paiknevas torus	D
	Mitmesooneline kaabel vabas õhus	E
	Ühesooneline kokkupuutega kaabel vabas õhus	F
	Ühesooneline õhkvahega kaablid vabas õhus	G

Vähendustegur on omane suurte ristlõigetega kaablitele ning näitab edastatava voolu ning pinge vähenemist kaabli tüübi tõttu. See tegur on toodud tavaliselt tootja kataloogides.

Lubatud pingelangud on üldiselt määratud vastavates standardites ning tavaliselt jääb see kaablite puhul alla 3%. Pingelang on tavaliselt toodud tootja kataloogis [11].

Temperatuuri piirides on määratud temperatuur maksimaalse lubatud pingelangu juures ning minimaalne temperatuur kaabli kaitsete töötamiseks lühisel. Juhtide arv näitab mitmeks kaabel hargneb tarbijate vahel. Kaabli või liini pikkus määratakse vastava tarbija kauguse kaudu toite punktist.

Juhtide ristlõiked olenevad suuresti vajadusest. Ristlõige määrab lubatava kestva voolu suuruse. Alumiiniumist juhi puhul peab kaabli ristlõige olema suurem kui vase puhul. Vase maksimaalne madalpinge ristlõige on 150 mm^2 ning lubatud voolu suurus ulatub sõltuvalt isoleermaterjalist 440 amprini. Kaitsejuhi ristlõige peab olema vähemalt 16 mm^2 [8].

Mudelis kasutatud liinide ning kaablite puhul tehtud valikud on esitatud tabelis 4.

Tabel 4. Madalpingevõrgu õppemudelil kasutatud parameetrid

Parameeter	Valik	Valiku põhjendus
Funktsionaalne vastupidavus	Puudub	Võrgumudel ei ole planeeritud tuleohtlikku keskkonna tarbeks.
Kaabli tüüp	Ühesooneline	Simarise programm lubab õhukaablitel kasutada vaid ühesoonelisi kaableid.
Isolatsioon	PVC70	Kõige standardsem variant.
Vähendustegur	1	Simarise vaikimisi valik.
Lubatud pingelangus	3%	Vastab standarditele.
Piirtemperatuurid	55/80°C	55°C on õhukaablitel ja –liinidel piisav maksimum töötemperatuuriks, et jääda pingelangu lubatud piiridesse, 80°C on minimaalne temperatuur kaabli kaitsete töötamiseks lühise korral ning on piisav, kuna paigaldus ei toimu eritingimustesse.
Juhtide arv	3	Erinevate tarbijate ühendamiseks.
Kaabli pikkus	min 15, max 25	Simarises pakutav standartne mõõt.
Kaablite ja liinide ristlõiked	50 mm^2	Tagab kolme PVC isolatsiooniga juhi kestva voolu 153 A.

2.4. Lülitite ja jaotuslattice valik

Lülitite valikul tuleb valida nii ühendust lahutav kaitselüliti ning vajadusel ka rikkevoolukaitselüliti. Joonisel 6 on esitatud Simarise nõutud parameetrid.

Nimetus

Maalühiskaitse

Lahklüliti valik kataloogist

Rikkevoolukaitselüliti

Circuit-breaker, LV

Automatic dimensioning

Designation: CB 35.2a

Earth fault detection: if required

Circuit-breaker

Catalog reference: 3VA11104EE360AA0

In / Icu: 100 A / 36 kA

Protective feature: LI

RCD

Catalog reference:

In / IΔn: /

Type:

OK Cancel



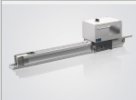


Joonis 6. Lülitite parameetrite valik Simaris Design'is

Maalühiskaitse on üks voolukaitse liik, mis kuulub kohustuslike releekaitsete alla, kuna kaitseb elu, tervist ja vara. Maalühiskaitse väldib tulekahjude ning loomade elektritraumade teket. Maalühis tekitab võrkudes suurt maaühendusvoolu, mis võib ulatuda mitmekümnete kiloamprieni. Maalühiskaitse toimimise tarbeks on vaja mõõte pinge- ja voolutrafodega nulljärgnevuspinget ja –voolu [17].

Nagu maalühiskaitse on ka rikkevoolukaitse mõeldud kaitsmaks inimest, loomi ning vara. Rikkevoolukaitselüliti ülesanne on kaitsta kokkupuute eest ohtliku pingega. Nagu ka maalühiskaitse, reageerib rikkevoolukaitselüliti rikkevoolule maa suhtes [18].

Mudeli jaoks sai valitud kataloogist kaitselüliti tööpingega 400 V, töötemperatuuriga 45°C, arvutusliku vooluga 100 A ning lahutusvõimega 160 A. Maalühiskaitse lisati ning seega ei valitud rikkevoolukaitselüliti.

Jaotuslattice valikul pidasin silmas Simarise pakutud lahendusi, mis on esitatud joonisel 7.

		Un-max	In	IP	Tap-off units
	System BD01 Power supply matching the exact requirements of small loads	400V	40..160A	IP54	63A
	System BD2 Flexible and safe power distribution in the medium current range for industry and buildings	690V	160..1250A	IP52/54/55	400A
	System LD Flexible power distribution for high currents in industry	1000V	1100..5000A	IP34/54	50..1250A
	System LI Flexible power distribution for high currents in industry and reliable power transmission from the transformer to the main distribution board in the building	1000V	800..6300A	IP55	50..1250A
	System LR An epoxy cast-resin totally encapsulated busbar suitable for use outdoors	1000V	630..6300A	IP68	800A

Joonis 7. Simaris Design jaotuslattice valikud

Jooniselt näeme, et oma parameetritelt sobivad BD tüüpi jaotuslatted väikese ning keskmise suurusega võimsuse ülekandeks eramutes ning tööstustes. LD süsteem on mõeldud peaaesjalikult suurtööstustes kasutamiseks. Antud lattice süsteemidest sobib mudeli jaoks kõige paremini LI süsteem, kuna oma parameetritelt sobib trafode ning tarbijate vahelisteks jaotuslatticeks. LR süsteem sobib hästi välistingimustesse.

2.5. Tarbijate parameetrite valik

2.5.1. Elamud

Elamute statsionaarse koormuse määramiseks on kasutatud tabelis xxx esitatud parameetreid. Elamuteks valisin elektrivõrku ühe korruselamu, ühe ridaelamu ning viis eramut. Valitud korruselamu on maagaasipliidiga. Valitud ridaelamu on elektripliidi, elektrikerise, otseelekterkütte ning kuumaveearustusega. Valitud eramud on kõik tahkekütuse pliitide ning ahjudega. Korterelamu kasulikuks pinnaks määran 3000 m², ridaelamu omaks 300 m² ning iga eramu omaks 200 m². Valemi 1.10. alusel saame eramute arvutuslikuks võimsuseks tabelis 5 esitatu.

Tabel 5. Elamute arvutusliku võimsuse valik mudelile

Tarbija	Arvutuslik võimsus
3000 ruutmeetrine korruselamu	53 kW
300 ruutmeetrine ridaelamu	51 kW
200 ruutmeetrised eramud (5 tk)	120 kW

Seega on tarbitav võimsus elamute poolt mudeli võrgus 224 kW. Tegemist on väga lihtsustatud arvutusliku võimsusega – täpsemaks arvutuseks peaksime käsitlema iga eramu elektritarviteid eraldi.

2.5.1. Tööstused

Tööstustarbijate puhul on oluline teada iga tööstuse eripära ning nende installeritud võimsust. Mudeli koostamisel ei ole kasutatud arvutuskäiku peatükis 1.4.1., kuna tegemist on lihtsustatud madalpingevõrguga ning antud arvutuskäik osutub liiga põhjalikuks. Selle asemel on autor aluseks võtnud Siemensi esitatud indikatsioonid võimsusnõudlusele eri funktsiooniga hoonetes.

Mudeli koostamiseks valiti üks masinaehitustööstushoone. Siemensi andmetel on sellise tööstuse võimsusnõudlus 100-200 W/m². Kuna tegemist on madalpingevõrguga, kus seadmed

ning liinide ristlõiked on väiksed, tuleb valida tööstuse pindalaks pigem väiksem hoone – näiteks 500 m². Seega saame valitud tööstushoone arvutuslikuks võimsuseks 50 kW [16].

2.6. Tootmisseadmete parameetrite valik

Tootmisseadmete seast tuleb valida madalpingevõrku sobivad tootmisseadmed. Simarise programm ei erista taastuvenergiaallikaid näiteks tuuleenergiaks ning päikeseenergiaks. Taastuvenergiaallika parameetrite määramine on esitatud joonisel 8.

Nimetus	Designation	Value
Näivvõimsus	Apparent power Sn [kVA]	60
Võimsustegur	cos(φ LF)	1
Võrgu tüüp (mahtuvuslik või induktiivne)	Type of infeed	Inductive
Arvutuslik vool	Rated current [A]	86.6
Maksimum koormustegur	Max. load factor	0.8
Trafo näivvõimsus	Infeed power S_LF [kVA]	48
Suurima lühisvoolu ja nimivoolu suhe	Ratio Ikmax / In	1.2
Maksimum lühisvoolu suurus kA-tes	Ikmax [kA]	0.104

Joonis 8. Taastuvenergiaallika parameetrite määramine Simaris Design'is

Näivvõimsus võrdub aktiivvõimsuse ning reaktiivvõimsuse geomeetrilise summaga. Võimsustegur näitab aktiivvõimsuse ning näivvõimsuse suhet. Väiksel tuulegeneraatoril on aktiivvõimsuse ning näivvõimsuse suhe, s.t võimsustegur 0,95. Seega võib arvestada näivvõimsuseks nende puhul aktiivvõimsuse väärtuse [5].

Päikesepaneelide võimsustegur cos φ on võrdne ühega. See tähendab, et ka nende puhul võib võtta näivvõimsuse võrdseks aktiivvõimsusega [15].

Mudeli tarbeks valime kaks taastuvenergiaallikat erinevate võimsustega – 10 kW ja 30 kW.

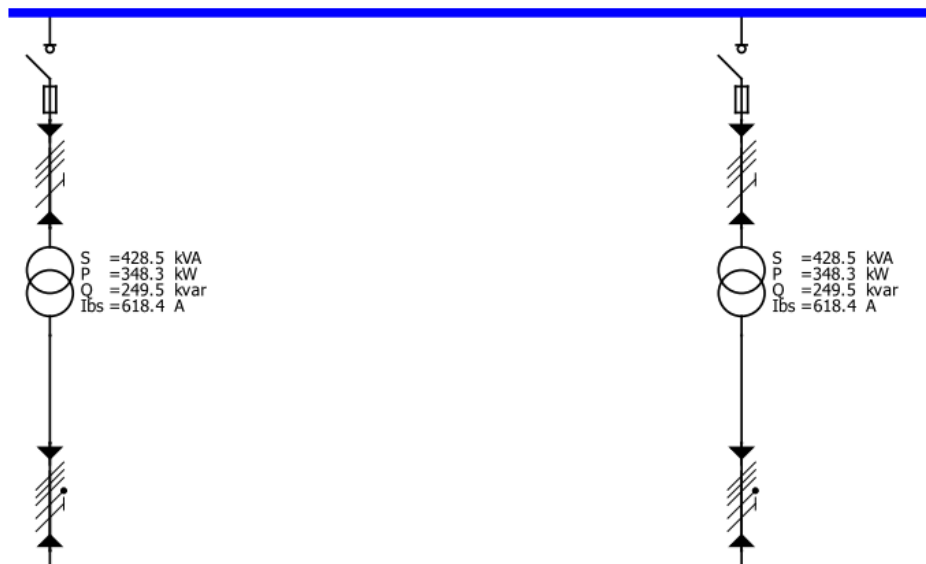
3. MUDELI ANALÜÜS

Simaris Design programm genereerib loodud mudelist erinevaid väljundeid. Visuaalseid väljundeid saab välja tuua viis:

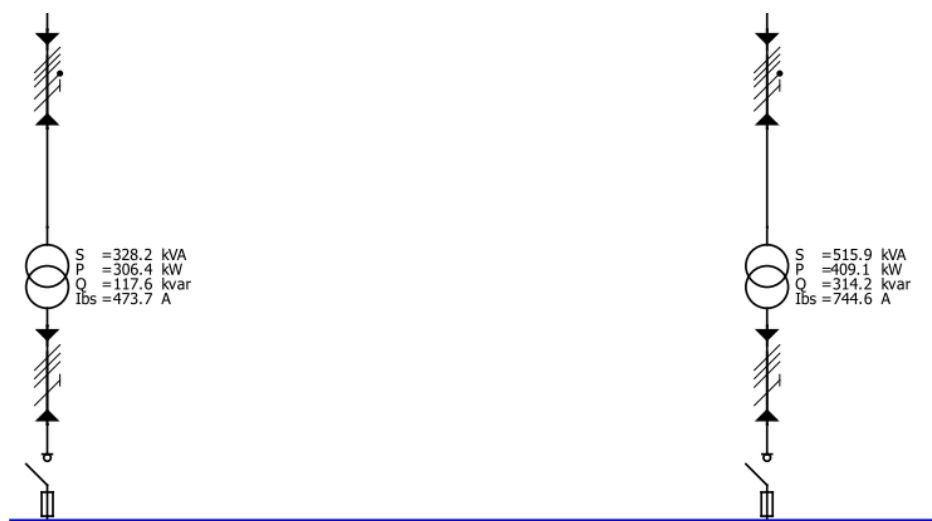
- seadmete nimetused koos kataloogiviidetega;
- seadmeid läbivad võimsusvood;
- võimalikud- ning tegelikult läbivad voolud;
- lühisvoolude suurused.

Seadmete kataloogiviited aitavad praktiliseks otstarbeks projekteeritud mudeli puhul leida vastavad tooted Siemensi kataloogist. Seadmeid läbivad võimsusvood näitavad seadmete näiv-, aktiiv- ja reaktiivvõimsust ning vastavat voolutugevust, mis neid läbib. Läbivad võimalikud ja tegelikud voolud toovad võrdluseks välja valitud seadmete nimi- ning tegelikud voolud. Viimane on oluline parameeter lühisvoolude suurustega võrdlemisel, et näha, kas valitud seade talub lühiseid võrgus.

Joonistel 9 ja 10 on näha kahe paralleelis töötava trafopaari võimsusvoogude erinevust. Esimesel trafopaaril on võimsusvood jaotunud võrdselt ning teisel on 187,7 kVA-ne võimsuste vahe.



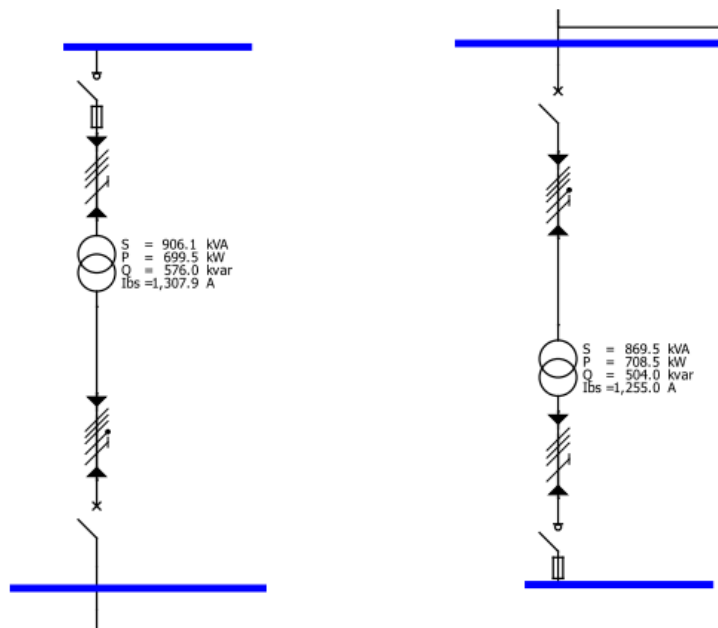
Joonis 9. Esimese trafopaari võimsusvood



Joonis 10. Teise trafopaari võimsusvood

Võimsusvoogude samasus esimesel trafopaaril on tingitud paralleelis töötamisest, s.t trafode vahel on koormus ühtlaselt jaotatud. Teise trafopaari puhul töötavad trafod eraldi ning ei jaga võimsusvooge.

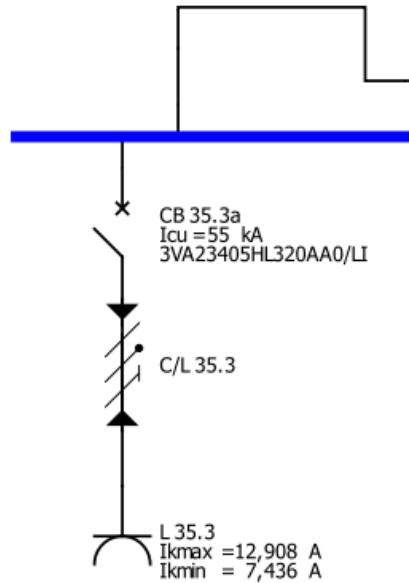
Üksikute trafode juurde on ühendatud kõik tootmisseedmed. Seega on neid läbivad võimsusvood oluliselt suuremad, kui eelnevalt vaadatud trafopaaridel. Võimsusvoogusid võib näha joonisel 11.



Joonis 11. Üksikute trafode võimsusvood

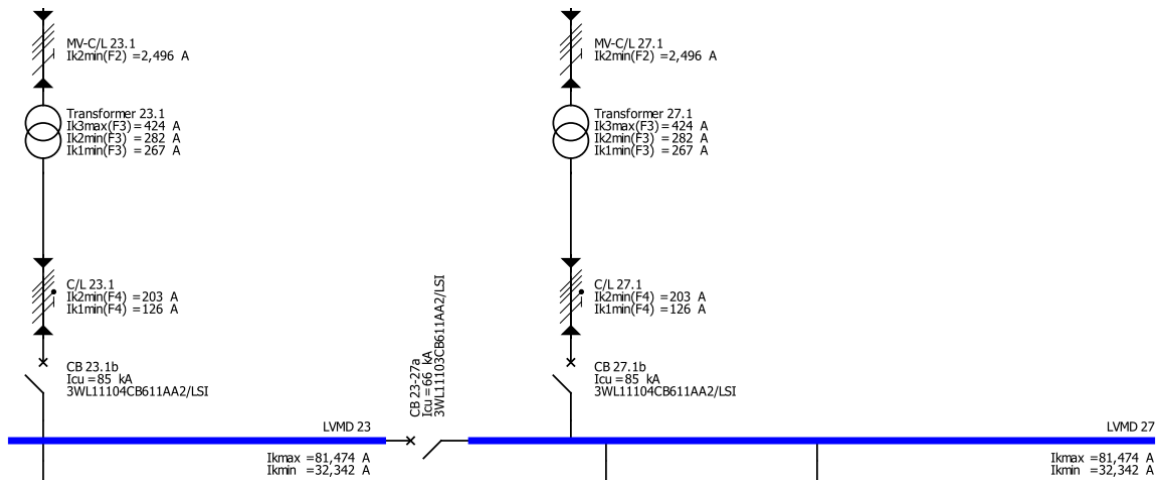
Lühisvoolude puhul saame uurida valitud lülitite sobivust erinevatel seadmetel võimalike tekkivate lühisvooludele. Järgnevalt vaatleme lühisvoolude suurusi tarbijate poolel

Lühisvoolud võivad mudeli järgi olla väga suured just tarbijatel - ulatudes mitmekümnete kiloampriteni. Joonisel 12 on võimalik näha korruselamu võimalike lühisvoole ning ühise kaitselüliti võimalikku lahutatavat lühisvoolu. Kuna antud korterelamu on ühefaasiline tarbija, siis on tema võimalikud lühisvoolud suuremad kui kolmefaasilisel tarbijal. Joonisel xx näeme, et tarbija juures tekkivad maksimaalsed lühisvoolud on 12,9 kA ning tarbijale valitud kaitselüliti on suudab lahutada kuni 55 kA-st lühisvoolu. Sellest võime järeldada, et antud tabijale on mõistlikum valida väiksema lahutusvõimega kaitselüliti.



Joonis 12. Korruselamu võimalikud lühisvoolud

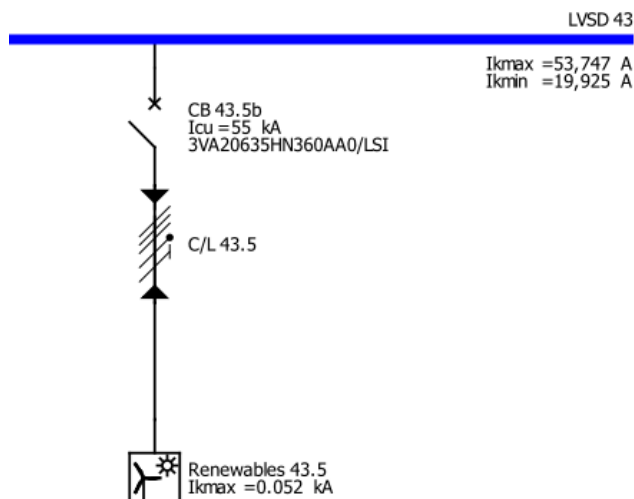
Järgnevalt uurime paralleelselt ühendatud trafode ning nendega seotud seadmete lühisvoole. Joonisel 13 on näidatud trafode, valitud kaablite ning jaotuslati minimaalseid ja maksimaalseid lühisvoole. Lisaks on näha kaitselülitite lahutusvõimet.



Joonis 13. Paralleelselt ühendatud trafode ja seotud seadmete lühisvoolud

Jooniselt näeme, et kõige suuremad lühisvoolud võivad tekkida trafode seksioonidel ulatudes 81,4 kiloampriini. Valitud trafo kaitselülitid on lühisvoolu lahutusvõimega 85 kA, s.t et valitud seadmed on piisavad trafode kaitseks madalpingel tekkivate lühiste eest.

Taastuenergiaallikate puhul näeme mudelist, et lühisvoolud tootmiseseadmel on väga madalad. Seda võib selgitada peamiselt otsese võrguühenduse puudumisega, s.t tootmiseseadme ning võrgu vahel on muundur, mille kontrollid piirab lühisvoole, et kaitsta seadme pooljuhte. Jooniselt 14 näeme, et 30 kilovatis taastuenergiaallika lühisvoolud ulatusid 52 amprini. Jaotuslatil tekkivad lühisvoolud on aga palju suuremad, seega peab kaitselüliti olema suurema lahutusvõimega.



Joonis 14. 30 kilovatis taastuenergiaallika ning seotud seadmete lühisvoolud

KOKKUVÕTE

Bakalaureuse lõputöös „Lihtsustatud madalpingevõrgu õppemudel“ uuris autor madalpingevõrgu elemente ning nende parameetrite määramise meetodeid. Töö esimeses osas keskenduti põhiliselt madalpingevõrgu lihtsustatud teoreetilisele osale, et anda ülevaade võrgu toimimisest. Teises osas valiti õppemudeli jaoks vajalike parameetritega seadmed ning kolmandas osas analüüsiti saadud tulemusi.

Töö eesmärgiks oli luua lihtsustatud õppemudel madalpingevõrgust ning autori hinnangul see eesmärk sai ka täidetud. Mudeli loomiseks kasutati modelleerimisprogrammi Simaris Design, mis võimaldas luua kompaktse ja ülevaatliku pildi madalpingevõrgust. Töös sai kasutatud programmi terve võrgu modelleerimiseks, kuid seda on võimalik kasutada ka hoone elektripaigaldise modelleerimiseks.

Kuna töös käsitleti madalpingevõrku lihtsustatult, siis autori hinnangul peaks järgnema antud tööle teine osa, mis valib põhjalikuma eeltööga mudelile sisendid ning analüüsib rohkemaid väljundeid, näiteks erinevate seadmete kaitsmeid.

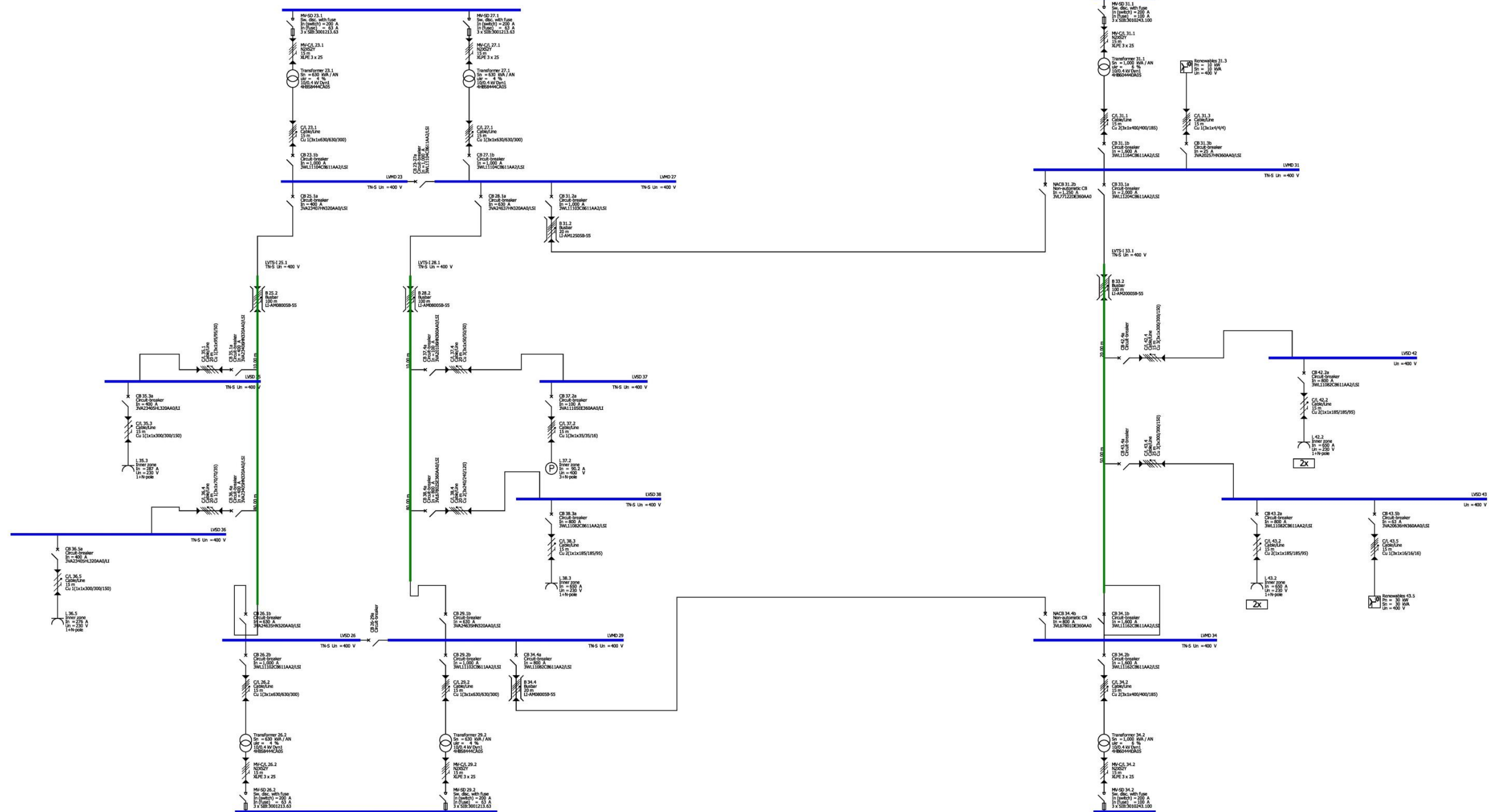
KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Aprelkova, K.** (2016). Väiketuulikute tasuvuse arvutamine (vajalike tuuletingimuste ja omatarbena kasutatud elektrienergia leidmine). Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituut. Tallinn. Lk 16-17.
2. **Csanyi, E.** (2014). Characteristics of XLPE insulated cables. Electrical Engineering Portal. [on-line] <https://electrical-engineering-portal.com/characteristics-of-xlpe-insulated-cables-with-reference-to-the-uk-standards> (25.04.2021)
3. **Eesti Tuuleenergia Assosatsioon.** Mis on väiketuulik. [veebileht] <http://www.tuuleenergia.ee/vaiketuulikud/mis-on-vaiketuulik/> (20.03.2021)
4. **Eland Cables.** (2021). What are the benefits of EPR insulated cables. [on-line] <https://www.elandcables.com/the-cable-lab/faqs/faq-what-are-the-benefits-of-epr-insulated-cables> (25.04.2021)
5. **GTZ.** (2009). Grid Integration of Wind Energy in the Western Cape. [on-line] https://www.westerncape.gov.za/other/2010/5/grid_study_gtz-deadp-eskom_final_report.pdf (24.04.2021)
6. **Hermann, T.** (2018). Päikeseenergia kasutamise võimalused. Bakalaureusetöö. Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut. Tallinn. Lk 22-25.
7. **Kalogirou, S.** (2014). Solar energy engineering: processes and systems. Lk 498-502. [on-line] EBSCO Discovery Service (06.04.2021)
8. **Kilter, J. Meldorf, M. Tammoja H. Treufeldt, Ü.** (2007). Jaotusvõrgud. TTÜ Kirjastus. Lk 40-41; 146-149; 164-168; 187; 214-222.
9. **Leuste, M.** (1999). Elektrivarustus. Tallinna Tehnikaülikool Elektriagamite ja jõuelektroonika instituut.
10. **Lüüs, T.** (2015). Taastuvressursside kasutamine talu autonoomse energiavarustuse korraldamiseks. Magistritöö. Eesti Maaülikooli tehnikainstituut. Tartu. Lk 44-46.
11. **Matjas I.** (2014). Alutechi tehase elektrivarustus. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituut. Tallinn. Lk 22-23.

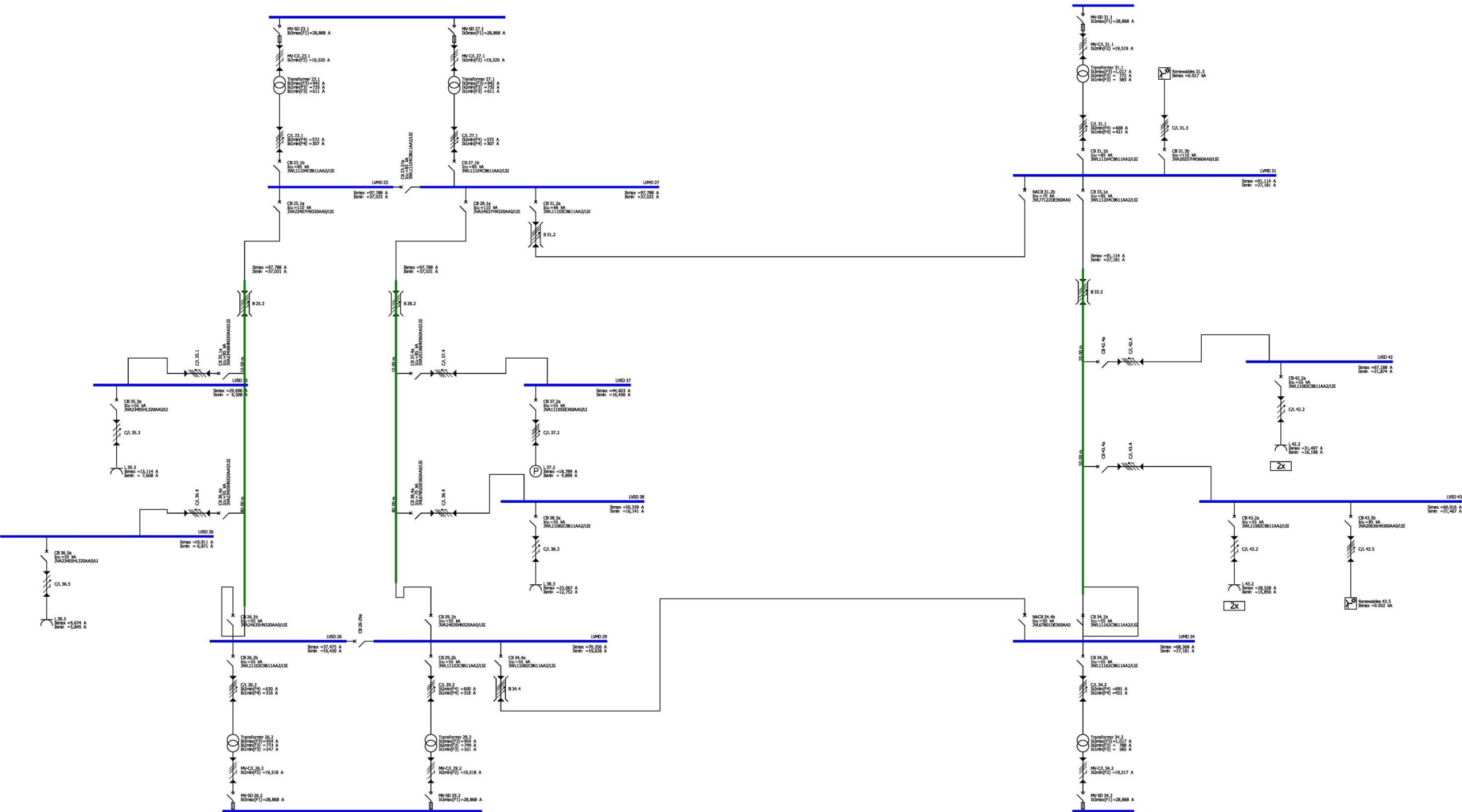
12. **Parmar, J.** (2012). Understanding vector group of transformer. Electrical Engineering Portal. [on-line] <https://electrical-engineering-portal.com/understanding-vector-group-transformer-1> (18.04.2021)
13. **Prolexplast OÜ.** (2012). Mis on PVC. [on-line] <http://www.prolexplast.ee/pvc.html> (25.04.2021)
14. **Saastamoinen, A.** (2009). Elektripaigaldustööd. Sähköinfo Oy. Lk 59-60.
15. **Salem, M.** (2017). Elamu autonoomne elektrivarustussüsteem. Bakalaureusetöö. Eesti Maaülikooli tehnikainstituut. Tartu. Lk 33.
16. **Siemens AG.** (2016). Planning of Electric Power Distribution. Technical Principles.
17. **Tammoja, H.** (2006). Automaatika ja releekaitse. Loengukonspekt. Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituut. Lk 30; 56.
18. **Teemets, R.** (2015). Elektriaparaadid. Rikkevoolukaitselüliti. Tallinna Tehnikaülikool. [veebileht] http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR3340/2_5_Rikkevoolukaitselyliti.pdf (25.04.2021)
19. **Teemets, R.** Vinnal, T. (2013). Elektrienergia säästlik kasutamine hoonetes. TTÜ Kirjastus. Lk 23-25; 35; 45-46; 135-137.
20. **Uudam, C.** (2015). Tuuleenergia väikelahendused. Säästva energia koolitusprogramm Kursessaares.

LISAD

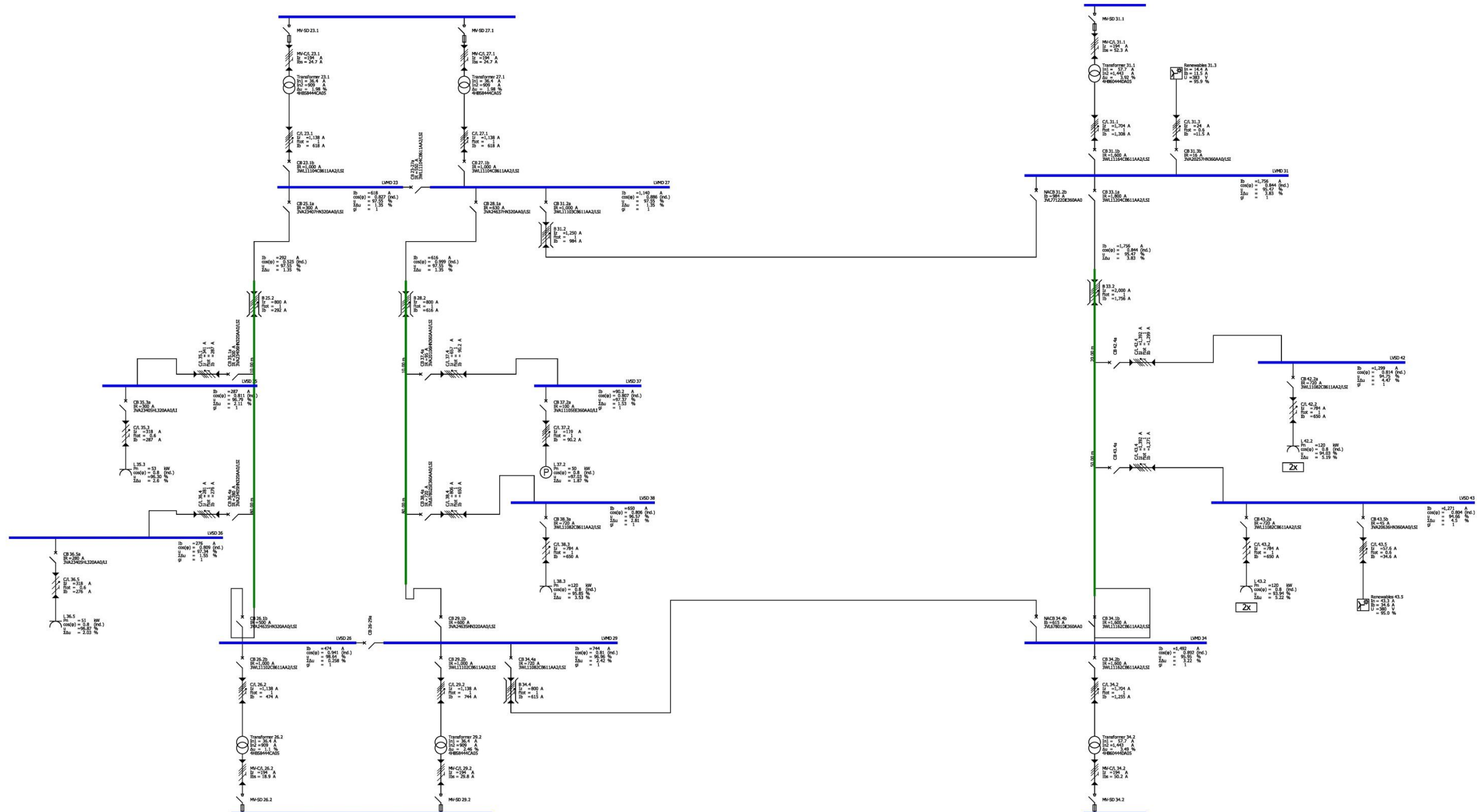
Lisa 1. Madalpingevõrgu õppemudeli seadmed koos põhiparameetritega



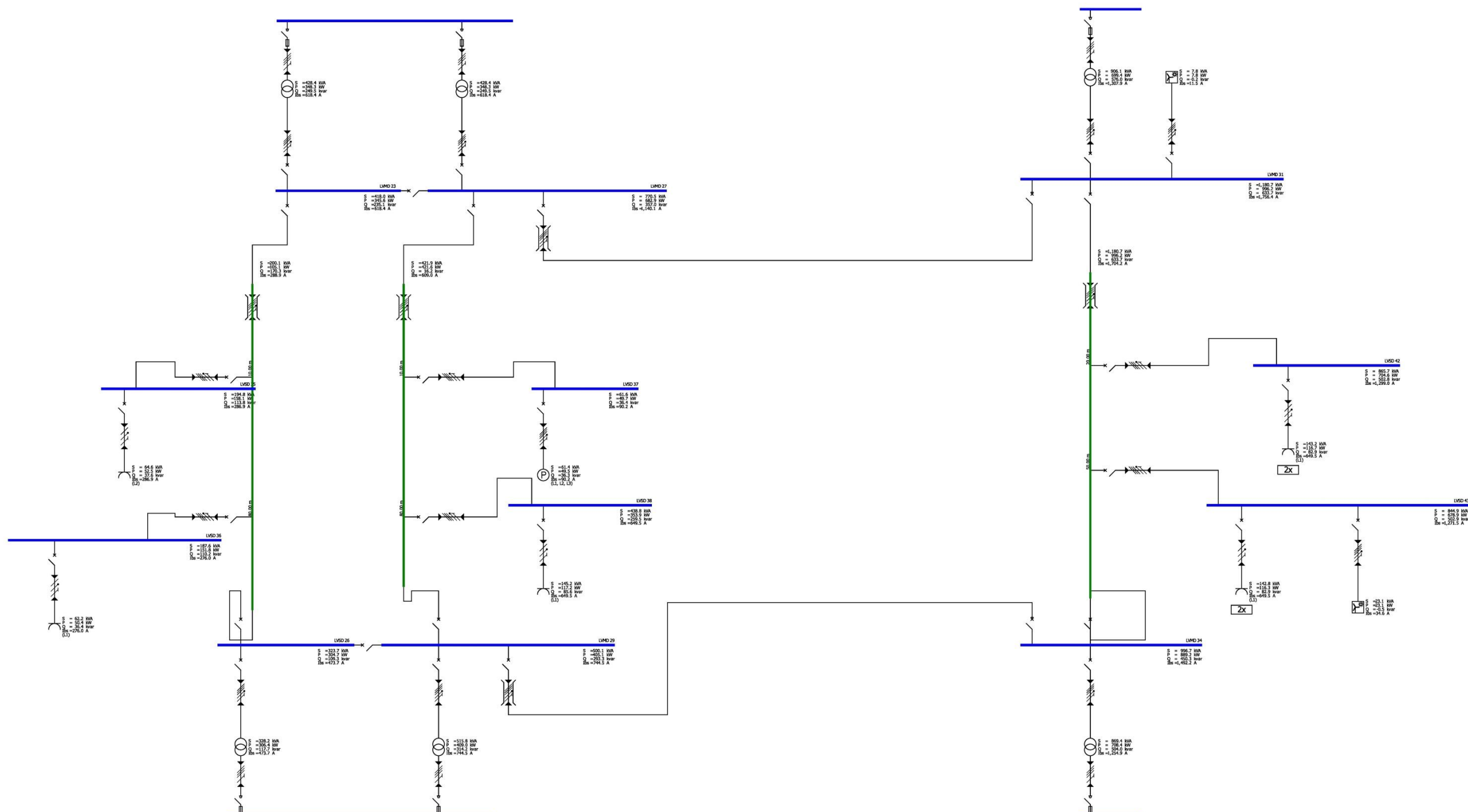
Lisa 2. Madalpingevõrgu õppemudeli lühisvoolud



Lisa 3. Madalpingevõrgu õppemudeli seadmete nimivoolud ning tegelikud voolud



Lisa 4. Madalpingevõrgu õppemudeli võimsusvood



Lisa 5. Programmi Simaris Design õppevahendina kasutamise juhend

1. Projekti defineerimine

SIEMENS
Ingenuity for Life

1 Project definition 2 Network design 3 Project output

Master data

Project name: Madalpingevõrgu mudel
Project description: Õppemudel
Planner: Emili Õun
Design office:
Created on: Wednesday, April 21, 2021
Changed on: Friday, April 30, 2021

Client data

Location:
Client:

Regional settings

Standard: IEC
Country: Eesti
Language: English

Comment

Technical settings

Medium voltage

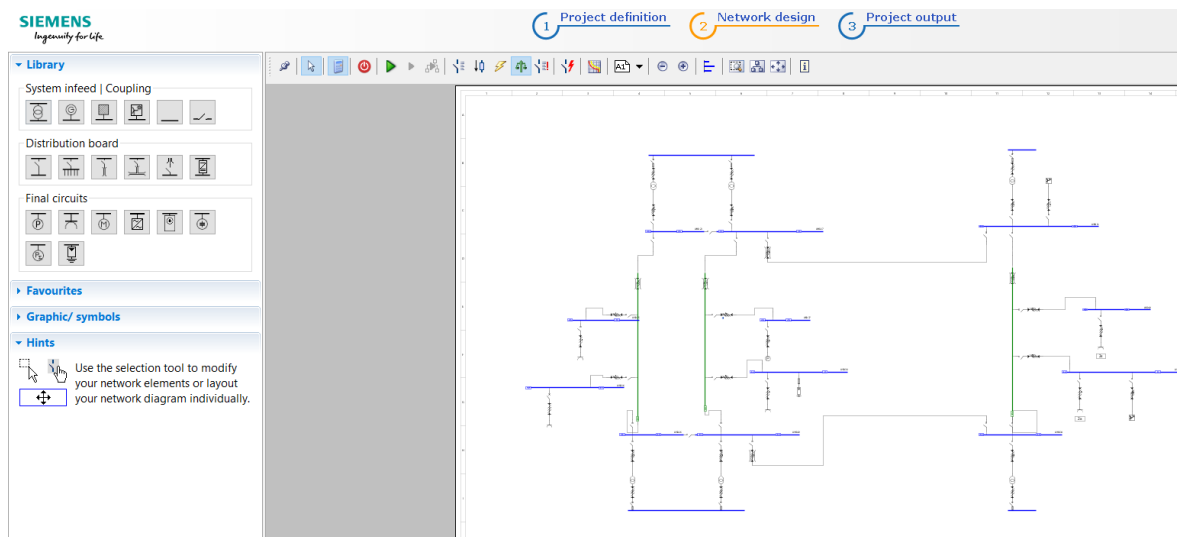
Nominal voltage [kV]: 10
Relative operating voltage at feeding point [%]: 100
Max. short-circuit power [MVA]: 250
Min. short-circuit power [MVA]: 100
Max. cross section [mm²]: 500
Min. cross section [mm²]: 25

Low voltage

Nominal voltage [V]: 400
Frequency [Hz]: 50
Permissible touch voltage [V]: 50
Load flow calculation: balanced
Reference point for voltage drop calculation: Transformer-secondary terminals
Max. permissible voltage drop in network [%]: 8
Ambient temperature of device [°C]: 45
Number of poles: 3-contact preferably, 4-contact if required
Earth fault detection: if required
Max. cross section [mm²]: 800
Min. cross section [mm²]: 1.5
Enable reduced cross-section of PEN-conductors: ☐

- Määrata projekti andmed
- Määrata võrgu üldised parameetrid (pinge trafo mähistel, võrgusagedus, maksimum ja miinimum lühisvoolud, maksimum ja miinimum ristlõiked, lubatud puutepinge, lubatud pingelang jne)

2. Võrgu disainimine



- Valida võrgu sisendid – transformaator, generaator, väline võrk, taastuvenergiaallikad, jaotuslatid (seksioonid), ühenduse valik
- Valida jaotusseadmed – jaotuslatt (seksioon), alamjaotuslatt grupeeritud seadmete lülile

- c. Valida võrgu väljundid – statsionaarne koormus, võrgu väljund (hoone puhul pistikupesa või pistikupesade grupp), mootor, sagedusmuundur, laadimispunkt (näiteks elektriauto puhul), kondensaator, ülepingekaitse

3. Võrgu dimensioneerimine ja väljundite saamine

- a. Määrata võrgu töörežiim(id)
- b. Programm dimensioneerib kogu võrgu
- c. Pärast dimensioneerimist tuleb üle vaadata programmi genereeritud sõnumid, kus kajastuvad võrgu puudused. Tuleb tegeleda sõnumite likvideerimisega mudelit parandades.
- d. Vaadata üle väljundid – seadmete parameetrid, võimsusvood, lühisvoolud, võrku läbivad voolud. Võimalik on ka genereerida oma vaade.

4. Dokumentatsiooni genereerimine

Lisa 6. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Emili Õun,

sünniaeg 23.11.1997,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Madalpingevõrgu lihtsustatud digitaalne mudel õppevahendina,

mille juhendaja on Andres Annuk,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

Emili Õun

(allkirjastatud digitaalselt)

Tartu, 27.05.2021

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Andres Annuk

(allkirjastatud digitaalselt)

27.05.2021